The Feasibility, Semantics, and Scope of Mobile Wireless Device-to-Device Networking

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
der RWTH Aachen University zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Inform.

Hanno Wirtz

aus Essen, Deutschland

Berichter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle
Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf

Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2014

Reports on Communications and Distributed Systems

edited by
Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle
Communication and Distributed Systems,
RWTH Aachen University

Volume 9

Hanno Wirtz

The Feasibility, Semantics, and Scope of Mobile Wireless Device-to-Device Networking

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3367-0
ISSN 2191-0863

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Wireless networking technology, as prevalently realized according to the IEEE 802.11 standard, successfully complements wired access to local networks and the Internet. Current mobile devices, such as smartphones, manifest wireless networking within everyday mobile scenarios and diverse and dynamic device-to-device (D2D) communication contexts that are independent from any network infrastructure, motivating the research directions of Mobile Ad-Hoc, Delay Tolerant, and Opportunistic Networking as well as Ubiquitous Communication. In these directions, D2D communication strives to facilitate mobile applications and therefore requires a technological basis for wireless networking between mobile devices that comprehensively manifests application semantics within the temporal and spatial scope of mobile communication contexts. Indeed, the 802.11 wireless networking capabilities of current mobile devices are, in principle, suited to provide this basis, enabling users to freely instantiate localized and autonomous communication structures.

In spite of this, very few academic approaches achieve the jump to real-world implementations and applications. We attribute this fact to three shortcomings in realizing mobile D2D networking within the wireless communication capabilities of current mobile devices and envisioned communication contexts. First, a lack of support for the 802.11 ad-hoc mode (AM), the traditionally assumed basis for mobile D2D networking, reduces its basic *feasibility* on current mobile devices. Second, the original design of 802.11 as a one-hop extension of wired networks cannot express application *semantics* that enable purposeful discovery of application participants within the sheer number of devices that make up current mobile scenarios. Similarly, the fundamental notion of an Ethernet-like binding of devices in networks in 802.11 cannot enable a comprehensive communication *scope* that makes the ubiquity of wireless devices accessible and available for communication.

This thesis addresses these specific shortcomings and proposes mechanisms that comprehensively enable mobile wireless D2D networking. First, we establish D2D networking in a network design that builds on the ubiquitously supported 802.11 infrastructure mode (IM), mitigating the lack of support for the AM and exposing the performance gains of the IM to mobile wireless networking. Our design affords network connectivity equivalent to the 802.11 AM with significantly fewer devices serving as forwarders and enables energy savings at both forwarding devices and commodity network participants.

Second, we propose a design to build wireless D2D networking around the availability of desired applications and content, mitigating the inability to express interests and semantics in 802.11. Our design exploits the pervasive and unrestricted scope of wireless broadcasts for discovery and subsequently instantiates D2D networking in dedicated 802.11 networks to facilitate high-performance mobile content exchange.

Third, we realize unrestricted ubiquitous wireless networking with all encountered devices in a network-less communication mechanism that exposes the temporal and spatial dynamics, diversity, and scope of wireless contexts to mobile applications. Building on this scope, we propose multiple compelling multimedia use cases that leverage local and immediate communication for direct interaction between mobile and stationary wireless devices.

Kurzfassung

Drahtlose Netzwerktechnologie, z.B. dem IEEE 802.11 Standard folgend, ergänzt den drahtgebundenen Zugang zu lokale Netzwerken sowie dem Internet. Mobile Geräte transportieren diese Technologie in alltägliche Szenarien und dynamische Kommunikationskontexte zwischen mobilen Geräten, unabhängig von existierenden Netzwerkinfrastrukturen. Kommunikation in diesen Szenenarien bilden die Grundlage für die Forschungsfelder Mobile Ad-Hoc Netzwerke, Verzögerungstolerante Netzwerke und Opportunistische Netzwerke sowie Ubiquitäre Kommunikation. In diesen Feldern dient die direkte Kommunikation zwischen mobilen Geräten der Realisierung mobiler Applikationen und benötigt eine technische Basis die mobile Netzwerke ermöglicht welche die Semantik der jeweiligen Applikation im momentanen zeitlichen und örtlichen Kontext widerspiegelt. Im Prinzip ermöglichen die 802.11-konformen Kommunikationsfähigkeiten mobiler Geräte die Bereitstellung dieser Basis indem sie Benutzer befähigen lokale und autonome Kommunikationsnetzwerke zu erstellen.

Trotz dieser prinzipiellen Fähigkeit werden solche akademischen Ansätze selten in reellen, verfügbaren Applikationen implementiert. Wir begründen diese Tatsache mit drei Unzulänglichkeiten der drahtlosen Kommunikationsfähigkeiten heutiger mobiler Geräte. Zunächst unterstützen heutige Geräte den 802.11 Ad-hoc Modus, die standardisierte Basis für direkte Kommunikation zwischen mobilen Geräten, nicht und reduzieren damit die grundsätzliche *Machbarkeit* solcher Kommunikation. Weiterhin sieht der Entwurf von 802.11 den *Transport von Applikationssemantik*, welche für eine zielgerichtete Suche von Anwendungsteilnehmern in der jeweils verfügbaren Anzahl von mobilen Geräten nötig ist, nicht vor. Schlussendlich verhindert die Ethernet-artige Bindung von Geräten zu einem 802.11 Netzwerk *uneingeschränkte Kommunikation* mit allen verfügbaren mobilen Geräten in Reichweite.

Die vorliegende Dissertation adressiert diese Unzulänglichkeiten und stellt umfassende Mechanismen für mobile, direkte Kommunikation zwischen mobilen Geräten vor. Wir stellen zunächst einen Netzwerkentwurf vor welcher auf dem allgegenwärtig unterstützten 802.11 Infrastruktur Modus basiert und die Kompatibilitätsproblematik des 802.11 Ad-hoc Modus umgeht. Weiterhin realisiert unser Entwurf die höhere Leistungsfähigkeit des Infrastruktur Modus in mobilen Netzen, ermöglicht vergleichbare Netzwerkkonnektivität und erlaubt die Einsparung von Energie bei sowohl angepassten als auch unangepassten Netzwerkteilnehmern.

Im Folgenden ermöglichen zwei Ansätze die Instanziierung von drahtlosen Netzwerken basierend auf der Verfügbarkeit und Auffindung von Applikationen und Daten und ergänzen 802.11 somit um eine Möglichkeit Applikationssemantik darzustellen. Unsere Ansätze benutzen die im Prinzip uneingeschränkte Ausbreitung drahtloser Signale zur Suche von Applikationen und Daten und instantiiert darauf folgend 802.11 Netzwerke direkt zwischen den beteiligten Geräten zum Austausch von Daten.

Zu guter Letzt stellen wir einen netzwerklosen Mechanismus vor der uneingeschränkte, generelle Kommunikation zwischen allen Geräten in Reichweite ermöglicht und damit den jeweiligen zeitlichen und örtlichen Kontext mobilen Applikationen zugänglich macht. Wir demonstrieren eine Reihe von Multimedia Anwendungen die auf diesem Kontext aufbauen und lokale Kommunikation für die direkte Interaktion zwischen mobilen Geräten nutzen.

Acknowledgements

A number of people contributed to the path that was my dissertation on personal and professional levels.

First, I want to thank my advisor Klaus Wehrle for initially offering me the chance to do a PhD in his group and for diverse, constructive, and honest discussions about research as well as every day life topics. I truly learned a lot in the exciting years at ComSys! Thank you for countless ideas, your unbridled enthusiasm, and for always maintaining the *what if / why not* perspective. I also want to thank Professor Lars Wolf for generously agreeing (on rather short notice and within a tight schedule) to act as the second opponent of my thesis and for the spontaneous defense planning session at MobiCom.

Second (but chronologically first), Tobias Heer deserves a bunch of thanks for 1) accepting my seminar paper an inch before the deadline, 2) never losing patience with me during my diploma thesis, 3) recommending me to Klaus for a PhD position, and 4) for serving as the best role model in all the important aspects a starting PhD student could hope for.

Third, Georg listened to all of the frustration that searching for a dissertation topic brings up and almost always had a helpful answer. René endured being my office mate and always provided constructive criticism and a great discussion partner. Hamad gave me my first cracks at independent paper writing as well as guidance when I got stuck being independent. Matteo mercifully read and definitely improved what I wrote as well as provided a novel point of view on both conducting research and eventually writing about the results.

Fourth, a number of students and colleagues contributed directly to this thesis in the form of either their bachelor or master thesis or as a co-author on one my papers. In no particular order, thank you, Robert, for a great conference trip and still the best acronym, Johannes for performance and energy efficiency, David and Ben for networking content, Martin for rescuing the work on mesh networks and for interacting with smart objects, Torsten for liberating wireless communication, Jan for making the latter usable and cool, and Jó for great insight into pretty much every question I asked.

Fifth, ComSys is a great place to ~~live~~ work because of the other people ~~living~~ working there. Thank you, Ulrike, Petra, Rainer, Kai, and Dirk for all your help on administrative issues and teaching. Raimondas, Stefan, Florian, Nico, Elias, Ismet, Janosch, Martin, Marco, Henrik, Oscar, Mirko, Christian, Donald, Oliver, Sepideh, and Uta: It was a pleasure to work with you, thanks for all the memories.

Sixth, my parents enabled me to pursue a degree in CS and supported me through times when I struggled.

Finally and most importantly, thank you, Chrissi, for your patience and understanding as well as providing the real-world perspective and balance I definitely needed.

Contents